

PROGRAMME NATIONAL SUR L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE.

Pollution des Eaux.

Projet Mer.

EXPLOITATION DES DONNEES DU POINT FIXE M06 PAR CORRELATIONS  
CROISEES.

Georges PICHOT <sup>x</sup> et Jean-Henri HECQ<sup>xx</sup>

N 20.

x Institut de Mathématiques  
Avenue des Tilleuls, 15

B 4000 LIEGE.

xx Laboratoire de Biologie Marine  
Quai Roosevelt, 1 bis

B 4000 LIEGE.

## INTRODUCTION.

---

Dans le cadre des campagnes de mesures du Programme National sur l'Environnement Physique et Biologique - Projet Mer , une station fixe a été effectuée pendant septante deux heures, du six au neuf décembre 1971, au point M6 de coordonnées  $51^{\circ} 28' 25''$  N- $03^{\circ} 09' 15''$  E situé dans la zone d'influence de l'estuaire de l'Escaut.

Des prélèvements ayant été réalisés toutes les trois heures, nous avons à notre disposition - du moins pour les valeurs en surface - de "bonnes" séries temporelles des variables reprises au Tableau I.

Bien que quelques chercheurs aient déjà commenté leurs propres résultats, il nous a paru intéressant de les reprendre tous, d'en faire un traitement statistique pour déceler les corrélations qui les lient et établir - entre "boîtes noires" dont nous voudrions arriver à écrire les équations d'évolution - le graphe des interactions possibles.

Liste des variables traitées.

X1(t)	=	concentration des nitrites en solution	(micro-gr. N/l)
X2(t)	=	concentration des nitrates en solution	(micro-gr. N/l)
X3(t)	=	" " phosphates " "	(micro-gr. P/l)
X4(t)	=	" " silices " "	(ppm)
X5(t)	=	" " de chlorophylle A	(mg/m <sup>3</sup> )
X6(t)	=	" " phéopigments a	(mg/m <sup>3</sup> )
X7(t)	=	" " chlorophylle a	(mg/m <sup>3</sup> )
X8(t)	=	Température de l'eau ( °C )	
X9(t)	=	Nombre de bactéries (germes totaux)	(col/ml)
X10(t)	=	Nombre de cnidaires	
X11(t)	=	Nombre de copépodes	
X12 (t)	=	Nombre de chaetognathes	
X13 (t)	=	Nombre de mysidacés	
X14 (t)	=	Nombre de schistomopsis spiritus ( espèce A )	
X15 (t)	=	Nombre de schistomopsis kervillei (espèce B)	
X16 (t)	=	Nombre de mesopodopsis slabberi ( espèce C)	
X17 (t)	=	Nombre de gastrosaccus sanctus (espèce D)	
X18 (t)	=	Nombre de gastrosaccus spinifer (espèce E)	
X19 (t)	=	Indice de diversité de X10, X11, X12, X13.	
X20 (t)	=	Indice de diversité de X14, X15, X16, X17, X18.	

TABLEAU I. Les variables X10, X11..., X18 sont en nombre d'individus rapportés à 2000 tours de flow-meter.

### 1/ Méthode statistique.

La méthode utilisée est celle des fonctions de corrélation croisée.

Soient deux séries temporelles discrètes

$$X_i = X_i(t) \quad i = 1, 2$$

dont les moyennes sont  $E\{X_i(t)\} = \mu_i$

On calcule successivement

les fonctions d'autocovariance

$$\gamma_{ii}(u) = E\{(X_i(t) - \mu_i)(X_i(t+u) - \mu_i)\} \quad (1)$$

les fonctions de covariance croisée

$$\gamma_{ij}(u) = E\{(X_i(t) - \mu_i)(X_j(t+u) - \mu_j)\} \quad (2)$$

et les fonctions de corrélation croisée

$$\rho_{ij}(u) = \frac{\gamma_{ij}(u)}{(\gamma_{ii}(0)\gamma_{jj}(0))^{1/2}} \quad \text{avec } |\rho_{ij}(u)| \leq 1. \quad (3)$$

Si  $\rho_{ij}(u)$  est nul pour tout  $u$ , les deux processus  $i$  et  $j$  sont complètement découplés; s'il est nul pour  $u$  seulement, ils ne sont corrélés qu'en simultanéité. Si, pour un  $u$  donné,  $\rho_{ij}$  est non nul, le comportement de  $j$  à un instant  $t$  est lié à celui de  $i$  à l'instant  $t-u$ ; si, de plus, il est supérieur à un  $\rho_{ij}$  de référence, fonction de  $u$  et du niveau de confiance choisi, cette liaison est statistiquement significative. Enfin  $\rho_{ij}$  peut être positif ou négatif suivant qu'il y a liaison "de pic à pic" ou "de pic à creux".

Une amélioration a été apportée à cette méthode classique.

En effet, si les deux séries (ou même l'une des deux) sont fortement autocorrélées, ces corrélations internes peuvent induire des corrélations croisées parasites. Lorsque ce cas s'est présenté, nous avons filtré les séries pour ne corrélérer entre eux que leurs reliquats désautocorrélés.

## 2/ Résultats .

Cette méthode a été appliquée aux vingt variables disponibles. Les quatre cent résultats sont résumés au Tableau II. En suivant la i-me ligne du tableau, on lit immédiatement l'influence des j variables sur la i-me : le signe plus ou moins indique celui de la corrélation, le chiffre avant le point, le retard d'influence (soit  $u = k \Delta t$  avec  $k = 1, 2, 3, \dots$  et  $\Delta t = 3$  heures) et les chiffres après le point, le niveau de confiance au dessus duquel la corrélation a été décelée .

## 3/ Commentaires.

### 3.1 En toute généralité.

Avant tout, il faut bien comprendre qu'une corrélation décelée entre deux processus signifie que le comportement de l'un à l'instant  $t$  présente des similitudes avec celui de l'autre à  $t + u$  et malheureusement pas qu'il y a corrélation de cause à effet entre le premier et le second.

Par exemple, ils peuvent être soumis à l'influence réelle d'un même troisième. C'est probablement ce qui se passe dans le problème qui nous occupe, où les variables sont influencées, en fait, par la marée responsable d'une émission d'eaux d'estuaire, chargées de nutriments et d'espèces planctoniques caractéristiques. En effet, sur les seize corrélations croisées avec décalage de douze heures, quatorze sont positives.

L'examen global du tableau II peut conduire aux remarques suivantes .

#### 3.1.1. Variable 4.

La silice dissoute n'influence aucune autre variable; cela confirmerait l'idée de l'utiliser en mer comme traceur aussi inerte et même plus sensible que la salinité.

	1	2	3	4	5	6	7
1	-	+ 0.001	+ 0.02 + 4.02	-	+ 2.05	-	-
2	+ 0.001	-	-	-	-	-	-
3	+ 0.02	-	+ 4.02	-	-	-	-
4	- 2.01	- 2.05	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	- 1.02	+ 0.01 - 1.05	-
6	-	-	-	-	+ 0.01 - 1.05	-	- 0.02
7	-	-	-	-	-	- 0.02	-
8	- 1.05 - 4.02	-	- 1.05	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	- 2.01
10	-	-	- 0.01	-	-	-	-
11	- 4.05	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	- 3.05	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	- 3.05	-	-	-	-	-	-
16	-	- 1.05	-	-	-	-	-
17	-	- 1.05	+ 0.05	-	-	-	-
18	+ 0.05	+ 0.05	+ 0.01	-	-	+ 2.05	-
19	-	-	-	-	-	-	-
20	- 1.05	-	-	-	-	-	-

Tableau II.

	8	9	10	11	12	13	14
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	+ 3.05	-
3	-	-	- 0.01	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-
10	+ 3.05	-	-	-	-	+ 1.05	-
11	- 1.01	-	-	-	+ 0.001	+ 0.01	+ 1.001
12	- 1.02	-	+ 4.05	+ 0.001 + 1.05	-	-	+ 5.05
13	+ 2.001	+ 4.05	-	-	-	+ 4.02	+ 0.001
14	+ 2.01	-	-	-	-	+ 0.001 + 4.05	-
15	+ 2.01	+ 4.05	-	-	-	+ 0.001 + 4.02	+ 0.001
16	+ 3.001	+ 5.02	+ 0.05	-	-	+ 1.001	+ 1.01
17	-	-	-	-	-	-	+ 0.02
18	-	-	-	-	-	-	+ 0.05
19	+ 1.05	-	0.05	- 0.001	-	-	- 1.02 - 2.05
20	- 2.02	-	-	-	-	+ 0.01	- 0.05

Tableau II (suite)

	15	16	17	18	19	20
1	-	-	+ 1.05	+ 0.05	-	-
2	+ 3.05	+ 2.05	+ 1.01	+ 0.05	-	-
3	-	-	+ 0.05	+ 0.01	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	+ 2.05
9	-	-	-	-	-	-
10	+ 1.05	+ 0.05	-	-	+ 0.05	-
11	+ 1.01	+ 3.05	+ 2.05	-	- 0.001	- 1.05 + 3.02
12	-	+ 4.001	-	-	-	-
13	+ 0.001 + 4.02	-	-	+ 4.05	-	+ 0.01
14	+ 0.001 + 4.05	-	+ 0.02	+ 0.05	-	- 0.05
15	+ 4.02	-	-	+ 4.05	-	- 0.01
16	+ 1.001	-	-	-	+ 2.05	-
17	-	-	-	-	-	-
18	-	-	+ 1.01	+ 1.01	-	-
19	-	-	- 2.01	-	-	-
20	- 0.01	-	-	-	-	-

Tableau II  
(suite).



### 3.1.2. Variable 8.

Il est étonnant de constater que la température de l'eau influence si fortement les variables zooplanctoniques. L'évolution de la température joue-t-elle le rôle d'horloge pour mettre en évidence le cycle nyctéméral du plancton ou est-elle l'indice de cette légère différence de température entre l'eau de l'Escaut et celle de la mer ?

### 3.1.3. Relation phyto-zooplancton.

Il n'y a pratiquement aucune corrélation entre les trois valeurs des concentrations pigmentaires, mesures de la biomasse phytoplanctonique et les onze valeurs relatives au zooplancton. De fait, en période hivernale, les rapports à l'intérieur de la biosphère sont réduits au minimum.

### 3.2. Niveau de confiance $10^{-3}$

Au niveau de confiance  $10^{-3}$ , les corrélations suivantes sont mises en évidence (tableau III).

#### 3.2.1. Corrélation ( $\text{NO}_2$ , $\text{NO}_3$ )

Dans une eau chargée de nutriments, il y a présence simultanée de nitrites et de nitrates.

#### 3.2.2. Corrélations (My,A), (My,B), (My,C), (A,B).

Ces corrélations sont évidentes puisque les espèces A, B et C font partie du groupe des Mysidacés et qu'elles y sont prédominantes.

#### 3.2.3. Corrélation (A,Co)

Cette corrélation avec décalage de trois heures est un indice de la succession de masses d'eau différentes : l'eau de l'estuaire dont l'espèce A des Mysidacés est l'indicateur privilégié est suivie par une eau du large caractérisée par les copépodes.

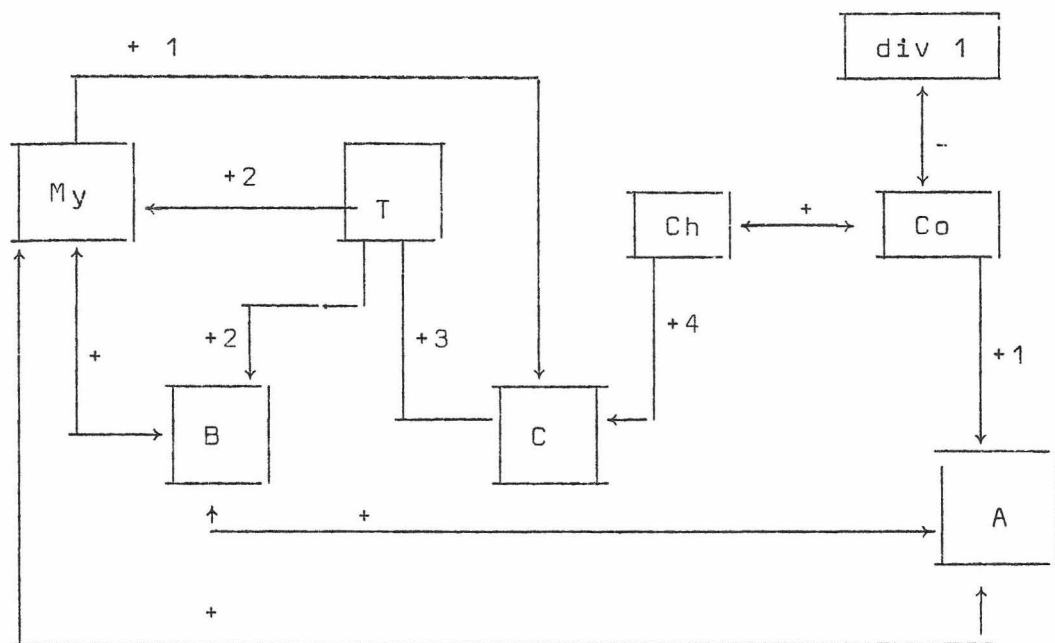
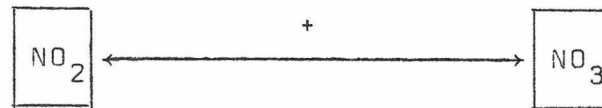


Tableau III : correlations au seuil  $10^{-3}$

3.2.4. La présence des copépodes est liée à celle des chaetognathes et, à une abondance de ces copépodes correspond une diminution de l'indice de diversité de l'ensemble (Co, Cn, Ch, My). Notons ici que cet indice semble être commandé par le groupe le plus nombreux et ne joue pas à cet égard son rôle de tampon.

3.2.5. La corrélation (Ch,C) avec décalage de 12 heures ne trouve pas d'explication satisfaisante.

### 3.3. Niveau de confiance $10^{-2}$ .

Au niveau de confiance  $10^{-2}$ , on note en-plus les corrélations suivantes (tableau IV).

3.3.1. De nombreuses corrélations déjà signalées au niveau  $10^{-3}$  sont confirmées. Ainsi les corrélations (My, Co), (My, B), ( $PO_4$ , Cn) et ( $PO_4$ , E) sont les indices du même phénomène qu'en 3.2.3. et (My, div.2), (B, div.2) qu'en 3.2.4.

### 3.3.2. Corrélation ( $NO_2$ , Si).

Cette corrélation négative, avec décalage de 6 heures, montre que les nitrites et les silices sont indicateurs d'eau d'estuaire. Si les seconds en avaient été une caractéristique aussi nette que les premiers, la corrélation aurait été positive et simultanée.

### 3.3.3. Corrélation (chl. A, phéo.a).

Cette corrélation est bien claire, puisque les deux variables sont des mesures de la même biomasse phytoplanctonique, la seconde étant cependant plus générale et englobant le phytoplancton photosynthétiquement inactif.

3.3.4. Nous n'avons pas de justification immédiate pour les corrélations (chl. a, G,t.), (D,  $NO_3$ ) et (D, div.1).

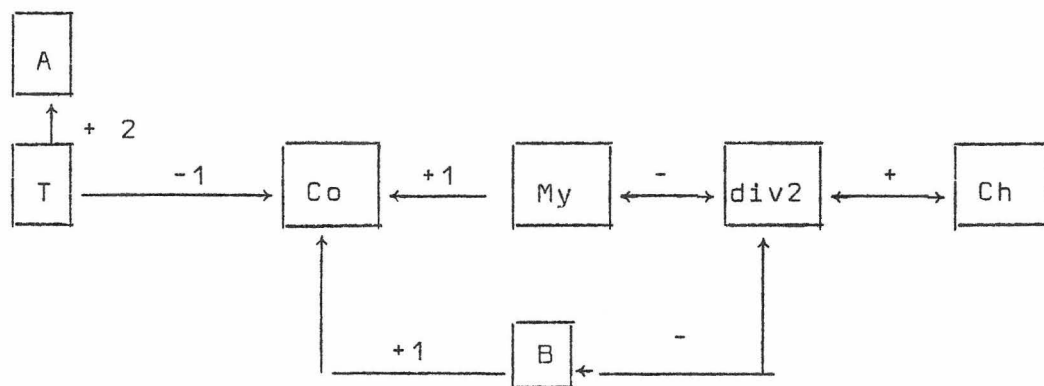
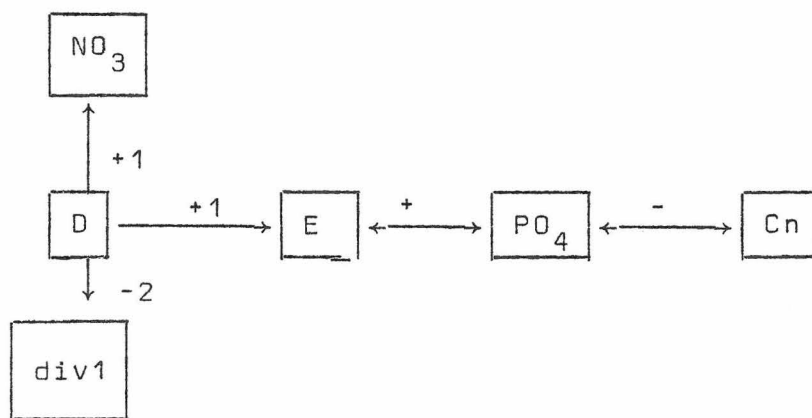
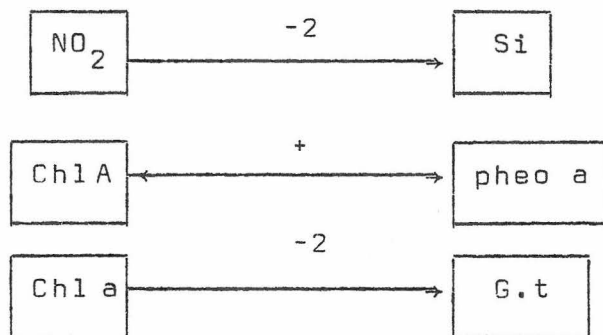


Tableau IV. Niveau de confiance :  $10^{-2}$

#### 4/ Conclusions.

4.1. Un programme de calcul a été mis au point pour le filtrage préliminaire des séries autocorrélées, le calcul des fonctions de corrélations croisées et le test de signification statistique. Il donne entièrement satisfaction et en donnera d'autant plus que nous pourrons disposer de séries temporelles plus longues.

4.2. Etudié dans des conditions hivernales, cet écosystème semble particulièrement inactif. L'évolution des variables et leurs interactions semblent commandées principalement par les marées, le mélange des eaux, la turbulence, c'est-à-dire par l'hydrodynamique.

4.3. L'analyse des corrélations croisées est une première étape dans l'établissement du modèle mathématique d'un écosystème. Les suivantes sont la précision des relations de cause à effet entre "boîtes noires" et la détermination des variables d'état devant entrer dans l'équation d'évolution de l'une d'elles. Le passage d'une étape l'autre est une démarche délicate qui ne pourra se réaliser qu'étayée d'une réflexion écologique approfondie.

## Références.

- BARBETTE(J.), (1971). Etude des variations dans les populations microbiennes au point 0006 du 6 décembre 1971 au 9 décembre 1971, Technical Report/Point fixe : Bact.01.
- ELSKENS(I.) et JANSSEN(D.), (1971). Dosages phosphates, Technical Report/Point fixe :Chim.01
- " " , (1971). Dosages Nitrate et Nitrite, Technical Report/Point fixe :Chim. 02.
- " " , (1971). Dosages Silice dissoute, Technical Report/Point fixe :Chim. 03.
- GOLDMAN(C.R.), GERLETTI(M.), JAVORNICKY(P.), MELCHIORI-SANTOLINI(U.) et DE AMEZAGA(E ), (1968). Primary Productivity, Bacteria, Phyto- and Zooplankton in Lake Maggiore :Correlations and Relationships with ecological factors, Mem. Ist. Idrob., 23 : 49-127.
- GRANGER(C.W J.) et HATANAKA(M.), (1964). Spectral Analysis of Economic Time Series, Princeton University Press, Princeton.
- HECQ(J.H.) et HEYDEN(D.), (1971). Etude du Zooplancton de surface au point M06 pendant 72 heures, Technical Report/Point fixe, Biol. :01.
- JENKINS(G.M.) et WATTS(D.G.), (1968). Spectral Analysis and its applications, Holden-Day.
- NIHOUL(J.C.J.), (1971). Ecosystemology applied to sea pollution, Programme National Belge sur l'Environnement Physique et Biologique, Report N6.
- STEVAERT(J.) et VAN BEVEREN(Ch.), (1971). Etude des variations pigmentaires à la station M06. Technical Report/Point fixe Biol. 02.